

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE ENCHIMENTO
PARA REMOÇÃO DE H_2S E CO_2 DE BIOGÁS PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Henrique da Cunha Sant'Ana

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
AGOSTO/2009**

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE ENCHIMENTO
PARA REMOÇÃO DE H_2S E CO_2 DE BIOGÁS PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Henrique da Cunha Sant'Ana

**Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental.**

**Orientador
Prof. Paulo Belli Filho
Co-orientador
Rodrigo Mohedano**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
AGOSTO/2009**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE ENCHIMENTO PARA
REMOÇÃO DE H_2S E CO_2 DE BIOGÁS PARA FINS ENERGÉTICOS**

HENRIQUE DA CUNHA SANT'ANA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental–TCC II

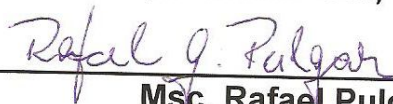
BANCA EXAMINADORA :



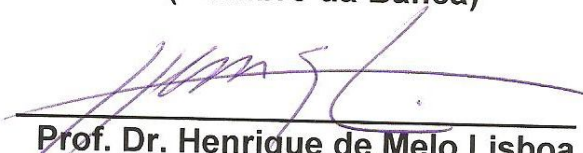
**Prof. Dr. Paulo Belli Filho
(Orientador)**



**Msc. Rodrigo de Almeida Mohedano
(Co-orientador)**



**Msc. Rafael Pulgar
(Membro da Banca)**



**Prof. Dr. Henrique de Melo Lisboa
(Membro da Banca)**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
AGOSTO/2009**

*Dedico este trabalho aos meus pais Lineu e Denise,
por todo amor, incentivo e apoio
em todas etapas de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À minha família: meus pais Lineu e Denise, meus irmãos Mariana e Gustavo, e o caçula Rafa, por todo apoio, compreensão, ajuda e companheirismo, mesmo nos momentos de distantes.

Ao prof. Paulo Belli Filho, pela orientação, confiança e oportunidade de aprendizado junto ao Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU).

Ao doutorando Rodrigo de Almeida Mohedano, pela amizade ao longo do tempo no laboratório e pelas contribuições para a realização do presente trabalho.

À banca examinadora, prof. Henrique de Melo Lisboa e Msc. Rafael Pulgar, pelas valiosas contribuições no final da execução deste trabalho.

À empresa RTP Indústria de Equipamentos Ltda ME, incentivadora e apoiadora do presente trabalho, por toda a ajuda e companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao LABEFLU pelo apoio e pela oportunidade oferecida.

À equipe do LABEFLU, pelo ótimo dia-a-dia neste ano juntos, regado a muito café.

À Netuno, pelas boas ondas de sempre. E ao mar...

Aos meus amigos, que vivenciaram junto comigo toda a trajetória nestes anos em Florianópolis. É difícil dar nomes, pois sempre nos esquecemos de alguns, mas não posso deixar de ressaltar os seguintes: Kalil, Murilo, Buiú, Julião, Monstro, Odreski, Delyra, Foca, Tico, Traki, Calil, Polaco, Japa, Mauricio M.P., Neif, André Siqueira, 51, Mark, Bodó, Carol, Déia, FeR...

Ao Luizão, grande amigo e companheiro nestes anos de Ilha da Magia.

À Giliane, pelo carinho, companhia e pelos ótimos momentos juntos.

À Floripa...

RESUMO

A necessidade de se ampliar a matriz energética nacional tem se evidenciado com a ocorrência de fatores como o apagão de 2001 e a diminuição da oferta de gás natural proveniente da Bolívia. Uma alternativa promissora para o Brasil é o uso de biocombustíveis. A digestão anaeróbia de resíduos provenientes dos setores industrial, rural e urbano gera um gás com alta concentração de metano, que o torna um biocombustível com alto poder calorífico. Porém, o processo de digestão anaeróbia gera também outros gases, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e o dióxido de carbono (CO_2), gases ácidos que danificam a estrutura de motores geradores de energia elétrica movidos a biogás. Lavadores de gás são equipamentos que há muito tempo vêm sendo utilizados como purificadores de gases e, dentre eles, destaca-se o do tipo Torre de Enchimento, por ser um equipamento barato e eficiente. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo dimensionar um lavador de biogás do tipo Torre de Enchimento em escala real para remoção de CO_2 e H_2S de biogás a ser utilizado como biocombustível em grupos geradores de energia elétrica, aumentando assim o poder calorífico deste biocombustível e a vida útil dos motores de grupos geradores. Para a realização deste trabalho, não foi possível a aplicação de metodologias usuais de dimensionamento de Torres de Enchimento. Optou-se por adotar um dimensionamento prático embasado em exemplos e recomendações encontrados na literatura. Para as condições estudadas neste trabalho, e considerando-se uma vazão de $50m^3/h$ de biogás e o uso de água como líquido de absorção, conclui-se que as dimensões da torre são 0,25 m de diâmetro e 1,93 m de altura, o volume de recheio é de 44,2 l, ocupando 0,9 m de altura da torre e a taxa de circulação de líquido de 3,54 l/min.

PALAVRAS-CHAVE: Digestão Anaeróbia, Biogás, Purificação de Biogás, Torre de Enchimento

ABSTRACT

There has been a need to extend the matrix of national energy as a result of a number of events such as the black-out in 2001 and the reduction of natural gas supplies from Bolivia. One potential alternative for Brazil is the use of biocombustibles. The anaerobic digestion of residues produced by the rural, urban and industrial sectors yields a gas with a high concentration of methane that turns them into a biocombustible with high calorific power. However, the process of anaerobic digestion also produces other gases such as hydrogen sulphide (H_2S) and carbon dioxide (CO_2), acidic gases that damage engines that generate electric energy or are run on biogas. A long time ago, scrubbers were used for purifying gases and one kind of equipment that is notable for being cheap and effective is called a Packed Tower. In the light of this, the aim of this study is to design a biogas scrubber of a Packed Tower kind that is suited to the removal of CO_2 and H_2S from the biogas that is being used as a biocombustible in groups of generators of electric energy. In this way, it will increase the calorific power of this combustible and the working life of the engines of the generators. In this study, it was not possible the application of the usual methodologies of dimensioning of Packed Towers. It was adopted a practical dimensioning based on examples and recommendations found in literature. For the conditions studied in this work, and taking into consideration the flow of 50m³/h of biogas and the use of water as the liquid of absorption, it may be concluded that the dimensions of the tower are 0,25 m of diameter and 1,93 m of height. The volume of packing is 44,2 l, occupying 0,9 m of the tower height and a flowrate of circulation of liquid of 3,54 l/min.

KEY-WORDS: Anaerobic Digestion, Biogas, Biogas Purification, Packed Tower

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de uma Torre de Enchimento com fluxo contracorrente.....	26
Figura 2: Esquema de um lavador de fluxo cruzado.....	27
Figura 3: Esquema de uma coluna de prato de borbulhamento.....	27
Figura 4: Torres de recheio randômico e estruturado.	29
Figura 5: Grupo gerador de energia elétrica a biogás instalado na Agropecuária Carboni, no município de Videira – SC.	30
Figura 6: Biodigestores da Agropecuária Carboni.....	31
Figura 7: Componentes do grupo gerador RTP modelo 8100B.	32
Figura 8: Componentes do sistema de cogeração de água quente.....	33
Figura 9: Dräger X-am 7000	34
Figura 10: Análises qualitativas do biogás da Granja Carboni	40
Figura 11: Anéis Pall.....	44
Figura 12: Distribuidores de líquido tipo I (a) e tipo II (b).	45
Figura 13: Grade-suporte simples.....	46
Figura 14: Torre de Enchimento	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Grupos de bactérias e fases distintas no processo de digestão anaeróbia.	18
Tabela 2: Características de diversos combustíveis.	21
Tabela 3: Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás.	22
Tabela 4: Possíveis métodos de tratamento de biogás	24
Tabela 5: Processos de remoção de CO ₂ , H ₂ S e água do biogás	25
Tabela 6: Desempenho previsto do grupo gerador RTP modelo 8100B.	32
Tabela 7: Faixas de concentração dos gases medidos pelo Drager X-am 7000.	35
Tabela 8: Análises qualitativas do biogás da Granja Carboni	40
Tabela 9: Parâmetros adotados para o dimensionamento da Torre de Enchimento	42
Tabela 10: Dimensionamento da Torre de Enchimento	42
Tabela 11: Dimensões adotadas da Torre de Enchimento.	43
Tabela 12: Características do distribuidor de líquido.	45
Tabela 13: Aspectos Gerais da Torre de Enchimento.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
AMP	2-amino-2-metil-1-propanol
atm	Atmosfera
CCE	Centro para a Conservação da Energia
CH ₄	Metano
cm	Centímetros
CO ₂	Dióxido de Carbono
CuSO ₄	Sulfato de Cobre
DEA	Dietanolamina
EDTA	Etilenodiamino Tetra-acético
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
Fe/EDTA	Solução Catalítica de Ferro com EDTA
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
in	Polegada
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
km	Quilômetros
km ²	Quilômetros Quadrados
l	Litros
l/min	Litros por minuto
LABEFLU	Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos
m	Metros
m/s	Metros por segundo
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
m ³ /h	Metros Cúbicos por Hora
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
MDEA	Metildietanolamina
MEA	Monoetanolamina

mm	Milímetros
N ₂	Nitrogênio
Nm ³	Vazão normalizada (em metros cúbicos)
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PE	Polipropileno Expandido
PP	Polipropileno
ppm	partes por milhão
PVC	Policloreto de Vinila
SC	Santa Catarina
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TBEE	2-tertiaributilamino-2-etoxietanol
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA	17
3.2 RESÍDUOS PARA A DIGESTÃO ANAERÓBIA	19
3.3 BIOGÁS.....	20
3.4 BIOGÁS COMO RECURSO ENERGÉTICO.....	21
3.5 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	23
3.5.1 LAVADORES DE GASES.....	26
3.5.2 TORRES DE ENCHIMENTO	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1 IDENTIFICAÇÃO DA SITUAÇÃO REAL	30
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	31
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO GRUPO GERADOR	32
4.2 ANÁLISES DO BIOGÁS	33
4.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	33
4.2.2 MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS	34
4.2.3 MEDIÇÕES EM CAMPO.....	35

4.3	DIMENSIONAMENTO DE LAVADOR DE BIOGÁS TIPO TORRE DE ENCHIMENTO	36
4.3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
4.3.2	CÁLCULO DO DIÂMETRO DA TORRE	37
4.3.3	CÁLCULO DO VOLUME DE RECHEIO.....	38
4.3.4	TAXA DE CIRCULAÇÃO DE LÍQUIDO	38
4.3.5	INTERNOS DA TORRE	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS A SER TRATADO	40
5.2	TORRE DE ENCHIMENTO	42
5.2.1	DIMENSIONAMENTO DA TORRE DE ENCHIMENTO.....	42
5.2.2	INTERNOS DA TORRE	43
5.2.2.1	ESCOLHA DO RECHEIO	43
5.2.2.2	DISTRIBUIDOR DE LÍQUIDO.....	44
5.2.2.3	SUORTE DE RECHEIO.....	46
5.2.3	ASPECTOS GERAIS DA TORRE DE ENCHIMENTO.....	46
5.2.4	DESENHO DA TORRE DE ENCHIMENTO.....	47
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A questão energética no Brasil passou a ter grande importância após o racionamento de energia elétrica que ocorreu em 2001, também conhecido como “escândalo do Apagão”. Este ponto frágil da história da matriz energética nacional evidenciou a necessidade de se investir em sua ampliação, que veio se reforçar recentemente com a diminuição da oferta de gás natural proveniente da Bolívia.

No estado de Santa Catarina, tem-se optado pela implementação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) para aumentar a oferta de energia elétrica. Porém, existe no estado uma grande potencialidade de se obter energia através de biomassa e biogás, ambos abundantes no meio rural, onde o estado se afirma como grande produtor de suínos e aves, e no setor industrial, bem difundido e em amplo desenvolvimento.

O tratamento anaeróbio dos dejetos gerados no meio rural, e dos efluentes gerados nos setores industrial e urbano, podem resultar na produção de biogás, importante matéria-prima que pode ser utilizada como combustível na geração de energia elétrica. Para isto, é necessário a implementação de um processo de purificação do biogás, devido à presença de diferentes contaminantes nele existentes. Dentre eles, destacam-se principalmente o sulfeto de hidrogênio - ou gás sulfídrico (H_2S), que possui ação corrosiva nos geradores de energia e nos motores à combustão adaptados ao uso do biogás, e o dióxido de enxofre (CO_2), que diminui o poder calorífico do biogás.

Lavadores de gases são equipamentos que há décadas vêm sendo utilizados como purificadores, destacando-se dentre eles o do tipo Torre de Enchimento, por ser um equipamento barato e eficiente.

O presente trabalho foi realizado junto ao Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através de um projeto coordenado pela empresa da RTP Indústria de Equipamentos Ltda ME.

Com o desenvolvimento de equipamentos voltados ao aproveitamento energético do biogás, pretende-se atender uma demanda pouco explorada no Brasil.

Para este tipo de aplicação são necessários equipamentos muito específicos, devido às particularidades encontradas neste tipo de combustível. Os equipamentos que se encontram hoje disponíveis no país são importados. Como benefícios para o setor empresarial podem-se citar o desenvolvimento de mercado nacional fornecedor de equipamentos, peças e serviços para o setor de biogás; desenvolvimento de mercado exportador de produtos para biogás; redução da dependência de produtos importados; auto-produção de energia elétrica, com incremento de renda para empresas que dispõem de tratamentos de efluentes orgânicos e produção de biogás; geração distribuída, utilizando energia renovável; e geração de empregos para a indústria de máquinas e equipamentos.

Desta forma, o setor industrial poderá encontrar uma alternativa energética ao uso do gás natural. Esta alternativa diminui a necessidade de se optar pelo uso de combustíveis fósseis, que torna o processo industrial mais impactante ao meio ambiente. Já o setor rural encontrará um incentivo ao tratamento dos dejetos gerados, podendo encontrar no biogás um estímulo à implementação de biodigestores que minimizem os impactos ambientais gerados no meio rural, protegendo os recursos hídricos e gerando biocombustível. No setor urbano, o biogás pode viabilizar energeticamente a implementação de estações de tratamento de esgotos (ETE) que fazem uso de reatores anaeróbios no tratamento de dejetos humanos, possibilitando uma maior abrangência da implementação do saneamento básico.

Assim, a sociedade catarinense como um todo pode ser beneficiada com a proteção dos recursos hídricos, com a minimização dos impactos na atmosfera e com a ampliação da matriz energética estadual.

Tendo em vista estes temas apresentados, este trabalho tem o objetivo de dimensionar um lavador do tipo Torre de Enchimento, em escala real, para remoção de gás sulfídrico (H_2S) e dióxido de carbono (CO_2) do biogás a ser utilizado como biocombustível em grupos geradores de energia elétrica. Deste modo, aumentar-se-à o poder calorífico deste biocombustível e a vida útil dos motores dos grupo geradores. Este trabalho poderá contribuir para o desenvolvimento de tecnologias para melhoria da qualidade do biogás produzido, visando à ampliação da matriz energética atual.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Dimensionar um lavador de biogás do tipo Torre de Enchimento em escala real para remoção de gás sulfídrico (H_2S) e dióxido de carbono (CO_2) do biogás a ser utilizado como biocombustível em grupos geradores de energia elétrica.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar uma situação real de utilização de biogás, em um grupo gerador de energia elétrica existente, para fundamentar o dimensionamento da Torre de Enchimento em escala real;
- Analisar o biogás a ser purificado na situação acima;
- Dimensionar um lavador de biogás tipo Torre de Enchimento compatível com o grupo gerador da situação real identificada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico, em que alguns microrganismos (principalmente bactérias anaeróbias e facultativas, fungos e protozoários) atuando na ausência de oxigênio molecular (O_2), transformam a matéria orgânica complexa solubilizada, ou em estado semi-líquido (lodo), em compostos mais simples o gás metano (CH_4) e o gás carbônico (CO_2), principais constituintes do biogás (BELLI Fº, 1995).

Segundo o Centro para a Conservação da Energia (CCE, 2000), a digestão anaeróbia é um processo em que alguns microorganismos que atuam na ausência de oxigênio atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos, produzindo compostos simples, como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). Ao mesmo tempo, estes microorganismos assimilam energia e os nutrientes necessários para sua sobrevivência e reprodução.

A conversão efetiva de materiais orgânicos complexos em metano depende da atividade combinada de diferentes populações de microorganismos, essencialmente constituídas por diversos gêneros de bactérias anaeróbias obrigatórias e facultativas. A digestão anaeróbia vem a ser um processo estável, resultado da ação coordenada desses diferentes microorganismos.

A decomposição anaeróbia de compostos orgânicos pode ser descrita como um processo de sete passos:

1. Hidrólise de proteínas, lipídios e hidratos de carbono
2. Fermentação de aminoácidos e açúcares
3. Oxidação anaeróbia de ácidos gordos de cadeia longa e alcoóis
4. Oxidação anaeróbia de ácidos gordos voláteis (exceto acético)
5. Conversão de CO_2 e H_2 em ácido acético
6. Conversão do ácido acético em CH_4
7. Conversão do H_2 em CH_4

De acordo com este esquema, podem-se distinguir quatro fases distintas do processo de digestão anaeróbia, levadas a cabo por três grandes grupos de microorganismos (Tabela 1).

Tabela 1: Grupos de bactérias e fases distintas no processo de digestão anaeróbia.

Fase	Grupo de bactérias	Passos
Hidrólise	Fermentativas	1.
Acidogênese		2. e 3.
Acetogênese	Acetogênicas	4. e 5.
Metanogênese	Metanogênicas	6. e 7.

A primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), como proteínas, lipídios e hidratos de carbono, em materiais dissolvidos mais simples, ou seja, moléculas menores, que podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esta conversão é obtida pela ação de exoenzimas excretadas por bactérias fermentativas hidrolíticas (BELLIF°, 1995; CHERNICHARO, 1997).

Na segunda fase do processo de degradação anaeróbia, os produtos solúveis oriundos da hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos, voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

Os produtos gerados na fase acidogênica são oxidados por bactérias acetogênicas em substratos apropriados para as bactérias metanogênicas. Estes substratos são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias metanogênicas são responsáveis pela etapa final do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono. Existem dois tipos fundamentais de bactérias metanogênicas, de acordo com o tipo de substrato que utilizam: as bactérias metanogênicas hidrogenotróficas, que

produzem metano através de H_2 e CO_2 ; e bactérias metanogênicas acetoclásticas, que utilizam o acetato (CHERNICHARO, 1997; CCE, 2000).

Além dessas quatro fases descritas anteriormente, o processo de digestão anaeróbia pode incluir uma quinta fase, dependendo da composição química do despejo a ser tratado. Despejos que contenham compostos de enxofre são submetidos à fase de sulfetogênese, que consiste na redução de sulfato e formação de sulfetos. A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos à base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto através de um grupo de bactérias denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras). Tais bactérias são consideradas um grupo muito versátil de microorganismos, capazes de utilizar uma ampla gama de substratos (CHERNICHARO, 1997).

3.2 Resíduos para a digestão anaeróbia

Os processos anaeróbios controlados pelo ser humano utilizam como substratos resíduos de natureza orgânica. Neles os microrganismos encontram a matéria orgânica e/ou os compostos químicos necessários para se desenvolverem.

É geralmente atribuída uma visão pejorativa aos resíduos, pois representam um problema que necessita de solução, quer em termos de tratamento, quer em termos de disposição final. A digestão anaeróbia pode assim ser uma ferramenta importante para criar condições de sustentabilidade à gestão, tratamento e destino final desses resíduos. A forte redução da carga poluente inicialmente presente nos resíduos e a produção de biogás para valorização energética podem proporcionar significativas economias em despesas de tratamento, podendo até mesmo gerar receitas que aumentem o valor do resíduo (CCE, 2000).

Existem três grupos principais aos quais se podem aplicar os processos anaeróbios:

- I. Resíduos agro-pecuários
- II. Resíduos industriais
- III. Resíduos urbanos

Dentro de cada um destes grupos existe uma grande variedade de oportunidades para aplicação da tecnologia de digestão anaeróbia, que fazem com que essa tecnologia se afirme cada vez mais como uma das formas mais eficazes de pré-tratamento e de valorização de resíduos (CCE, 2000).

A digestão anaeróbia é tida como forma de valorização de resíduos devido à geração, neste processo, de resíduos que possuem valor econômico. Dentre eles, destaca-se o biogás como uma alternativa energética de valorização de resíduos.

3.3 Biogás

O termo biogás é utilizado para denominar o gás gerado a partir da digestão anaeróbia biológica da matéria orgânica. É composto por uma mistura de gases cuja proporção varia de acordo com as características do tipo de resíduo e das condições de funcionamento do processo de digestão.

Sem deixar de lado a grande contribuição ambiental do tratamento de esgotos, reduzindo a poluição dos corpos hídricos, tem-se destacado no processo da digestão anaeróbia a produção de um combustível alternativo, o biogás (AVELLAR et al., 2002).

Os principais constituintes do biogás são o metano e o dióxido de carbono. Outros gases, como o sulfureto de hidrogênio, também estão presentes, porém em quantidades inferiores. As proporções típicas de metano e dióxido de carbono no biogás são: CH₄: 50 a 80%; CO₂: 20 a 40%. Hidrogênio e azoto variam entre 1,5 e 6% e o sulfureto de hidrogênio, juntamente com outros gases, variam de 1 a 5% (LA FARGE, 1995).

A coleta de um gás combustível obtido em um processo biológico foi primeiramente documentada na Inglaterra, em 1895, em um sistema de tratamento dos sólidos do esgoto municipal (METCALF e EDDY, 1979). O processo de biodigestão anaeróbia do estrume de bovinos e outros resíduos do meio rural em pequenos biodigestores foi estudado na Índia, em 1941 (MAZUMDAR, 1982) e, desde então, o processo tem sido aplicado no tratamento de uma série de resíduos de origem industrial, agropecuária e urbana.

O interesse como recurso energético do biogás deve-se à grande quantidade de metano presente em sua composição, visto que, ao ser misturado com ar, se transforma em uma mistura de alto potencial de combustão.

3.4 Biogás como Recurso Energético

Para se realizar um estudo da viabilidade de emprego do biogás como recurso energético, normalmente se avalia a equivalência energética entre o biogás e o combustível a ser substituído. Além do poder calorífico, deve-se também observar outras propriedades como acidez, pressão e presença de contaminantes. Estas considerações contribuem para uma adequada previsão das adaptações que venham a ser necessárias, tanto no caso do emprego do biogás como único recurso energético, como no uso simultâneo do biogás com outro combustível (COSTA, 2006).

Observa-se na Tabela 2 uma análise comparativa entre alguns tipos de combustíveis, contemplando valores de massa específica e poder calorífico inferior (água em forma de vapor) e superior (água na forma líquida).

Tabela 2^A: Características de diversos combustíveis.

Combustível	Massa Específica kg/Nm ³	Poder Calorífico	
		Inferior kcal/kg	Superior kcal/kg
Petróleo	867	10.200	10.900
Carvão vapor	n.d.	4.000	4.460
Carvão Metalúrgico	n.d.	7.425	7.700
Lenha	390	2.530	3.300
Cana de açúcar	n.d.	917	1.030
Óleo Diesel	851	10.180	10.750
Óleo combustível	999	9.547	10.900
Gasolina	738	10.556	11.230
GLP	552 (liq.) 2,29 (gás)	11.026	11.750
Nafta	704	10.462	11.320
Querosene	787	10.396	11.090
Gás canalizado	n.d.	4.230	4.700

n.d. = não disponível

No caso de gases trata-se de Nm³, nas CNTP (1 atm, 0°)

Fonte: ALVES (2000)

Tabela 2^B: Características de diversos combustíveis.

Combustível	Massa Específica kg/Nm³	Poder Calorífico	
		Inferior kcal/kg	Superior kcal/kg
Gás de coqueira	n.d.	4.400	4.500
Coque de carvão mineral	n.d.	6.900	7.300
Lixívia	2100	n.d.	3.030
Carvão vegetal	250	6.115	6.800
Álcool anidro	791	6.400	7.090
Álcool hidratado	809	5.950	6.650
Bagaço de cana	n.d.	1.777	2.257
Gás de refinaria	0,78	8.272	8.800
Gás natural	n.d.	8.554	9.400

n.d. = não disponível

No caso de gases trata-se de Nm³, nas CNTP (1 atm, 0°)

Fonte: ALVES (2000)

As características do biogás variam de acordo com diversos fatores, como temperatura, pressão, umidade, concentração de gases inertes e, principalmente, devido à concentração de metano. A Tabela 3 apresenta a variação do poder calorífico inferior do biogás em relação à concentração de metano e dióxido de carbono.

Tabela 3: Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás.

Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 30% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: AVELLAR (2001)

O metano puro, nas condições normais de temperatura e pressão, possui poder calorífico inferior de aproximadamente 8.116 kcal/Nm³. O biogás com 65 % de metano tem poder calorífico de aproximadamente 5.339 kcal/m³, uma vez que apenas a porção de metano irá queimar. Para fins comparativos de energia fornecida, 1 m³ de biogás com 65% de metano equivale a 0,6 m³ de gás natural; 0,882 litros de propano; 0,789 litros de butano; 0,628 litros de gasolina; 0,575 litros de óleo combustível; 0,455 kg de carvão betuminoso ou 1,602 kg de lenha seca (ROSS et al., 1996).

Para a recuperação de biogás, para fins energéticos, são identificadas poucas empresas com tecnologia apropriada para o desenvolvimento de projetos deste gênero. Para que o biogás possa ser utilizado, é fundamental que seja feita uma redução das concentrações de H₂S e CO₂, assim como uma redução da umidade e de eventuais materiais particulados do mesmo. A este processo dá-se nome de purificação do biogás.

3.5 Purificação do Biogás

Os sistemas de purificação de biogás são desenvolvidos para corrigir as propriedades naturais do biogás para que o mesmo atenda às especificações técnicas dos equipamentos de conversão deste biocombustível em energia elétrica.

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente. Estas substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. Pode ocorrer combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão precoce provocada pela presença do ácido sulfídrico (H₂S), diminuindo tanto o rendimento quanto a vida útil do motor térmico.

O biogás é um gás ácido e sua composição é variável. A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 e 2% de H₂S e significantes quantidades de mercaptanas, observando-se também a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (AJAX ENGINES, 1999; apud ALVES, 2000). O H₂S é tóxico e altamente corrosivo. Portanto, devido a algumas propriedades do H₂S, sua remoção normalmente é feita diretamente no local de produção do biogás.

Mostra-se na Tabela 4 um resumo de possíveis métodos de tratamento de gases para diferentes constituintes do biogás, sendo que seus custos variam de acordo com a disponibilidade tecnológica e de materiais na localidade.

Tabela 4: Possíveis métodos de tratamento de biogás

Compostos Alvo	Tipo de Tratamento	Alternativas
Água	Adsorção	sílica gel
		peneiras moleculares
		alumina
	Absorção	etileno glicol (-30°)
		solventes orgânicos
	Condensação	refrigeração
Hidrocarbonetos	Adsorção	Carbano ativado
	Absorção	Absorção em óleo de má qualidade
		etilenoglicol (-30°)
		solventes orgânicos
	Combinação	refrigeração com etilenoglicol acrescido de adsorção por carvão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Adsorção	peneiras moleculares
		Carbano ativado
	Absorção	solventes orgânicos
		soluções alcalinas de sal; carbonato de potássio quente
		mono alcanolaminas, aminas
		di-tri-etanol, diglycolamine
	Separação por membranas	membrana de cavidade fibrosa
H ₂ S		esponja de ferro

Fonte: Biogás Purification Overview, G.M. Savage e L.F. Diaz, 8th Annual BioCycle Conference On Renewable Energy From Organics Recycling – Madison, Wisconsin (6 a 8 de outubro de 2008)

Na Tabela 5, encontram-se diferentes processos de remoção de CO₂, H₂S e água do biogás, com os respectivos meios de extração e mecanismos de remoção.

Tabela 5: Processos de remoção de CO₂, H₂S e água do biogás

Processo	Impureza	Meio de extração	Mecanismo de remoção do gás
Lavador de gases	CO ₂ , H ₂ S	água	absorção física
Selexol	CO ₂ , H ₂ S, H ₂ O	DMPEG	absorção física
Solvente de Flúor	CO ₂ , H ₂ S	propileno carbonato	absorção física
Purisol	CO ₂ , H ₂ S, H ₂ O	NMP	absorção física
Rectisol	CO ₂ , H ₂ S, H ₂ O	metanol	absorção física
Desidratação com glycol	H ₂ O	TEG	absorção química
Benfield	CO ₂ , H ₂ S	K ₂ CO ₃	absorção química
Catacarb	CO ₂ , H ₂ S	K ₂ CO ₃	absorção química
Giammarco-Vetrocoke	CO ₂ , H ₂ S	K ₂ CO ₃	absorção química
Monoetanolamina	CO ₂ , H ₂ S	MEA	absorção química
Dietanolamina	CO ₂ , H ₂ S	DEA	absorção química
Flúor Econamina	CO ₂ , H ₂ S	DGA	absorção química
Sulfinol	CO ₂ , H ₂ S	sulfolano	absorção química e física
Separação por Membrana	CO ₂ , H ₂ S	membrana	absorção por membranas
Peneiras Moleculares	CO ₂ , H ₂ S, H ₂ O	peneira molecular	adsorção física
Óxido de Ferro	H ₂ S	FE ₂ O ₃	absorção química

Fonte: Biogás Purification Overview, G.M. Savage e L.F. Diaz, 8th Annual BioCycle Conference On Renewable Energy From Organics Recycling – Madison, Wisconsin (6 a 8 de outubro de 2008)

Diversos estudos para remoção de CO₂ e H₂S têm sido realizados por diferentes autores, envolvendo diferentes processos e mecanismos de remoção desses gases, devido à grande importância deste tema.

3.5.1 Lavadores de gases

Lavador de gás é um nome genérico de um dispositivo de controle da poluição do ar que usa processos de absorção para separar um poluente de um fluxo gasoso. Absorção é o processo físico (muitas vezes intensificado quimicamente) em que o poluente deixa a fase gasosa e é dissolvido na fase líquida, ou seja, no líquido absorvente utilizado no lavador de gás. Tais lavadores são agrupados como se segue (HEINSOHN 2000 apud DAVIS, 2000):

- Torres de Enchimento com fluxo contracorrente, de recheios randômicos ou estruturados (Figura 1);
- Lavadores de fluxo cruzado (com recheios randômicos ou estruturados) (Figura 2);
- Coluna de pratos de borbulhamento (Figura 3).

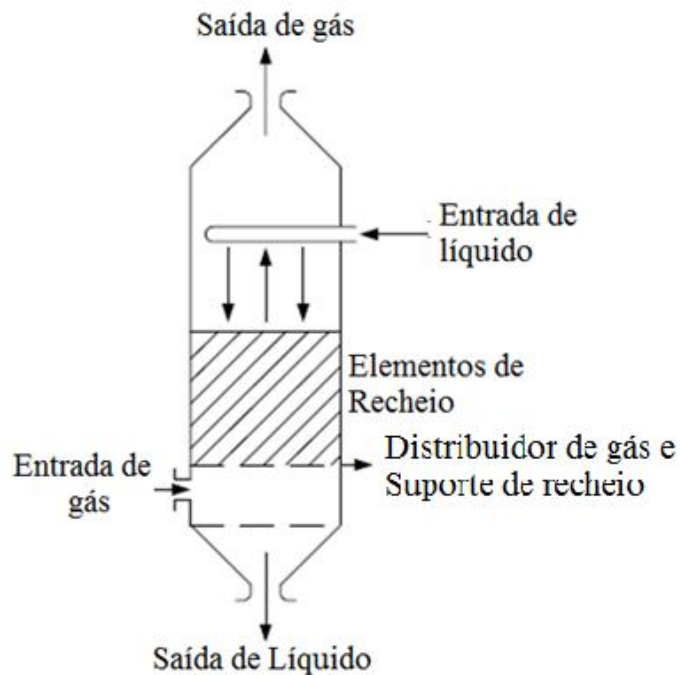


Figura 1: Esquema de uma Torre de Enchimento com fluxo contracorrente
Fonte: SCHNELLE *et al.*, (2001).

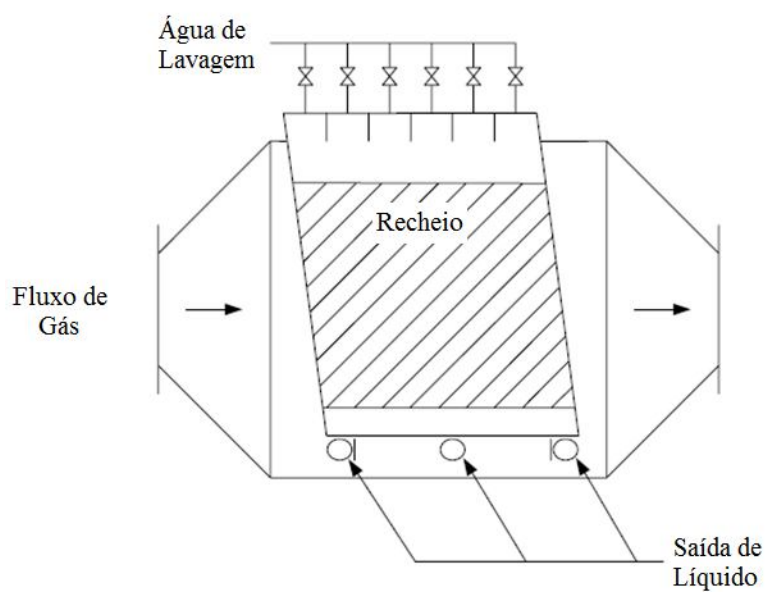


Figura 2: Esquema de um lavador de fluxo cruzado
 Fonte: SCHNELLE *et al.*, (2001).

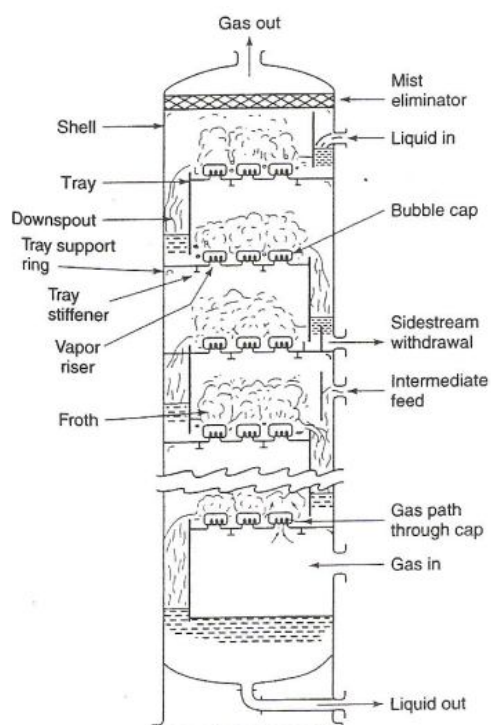


Figura 3: Esquema de uma coluna de prato de borbulhamento
 Fonte: TREYBAL (1980).

No setor industrial, lavadores de gases têm sido usados há mais de um século. Em 1836, por exemplo, uma patente de uma Torre de Enchimento foi emitida. Cem anos depois, em 1935, os ingleses atingiram a remoção de 98% de SO₂ através lavadores de gases de combustão. Um lavador para controle de partículas foi patentado em 1901, estendendo o uso dos lavadores para controle de partículas e gases (SCHIFFTNER, 1996).

Teoricamente, a absorção de um poluente de uma fase gasosa por contato em uma fase líquida ocorre quando o líquido contém menos do que a concentração de equilíbrio para esse poluente. Em outras palavras, o poluente da fase gasosa deve ter alguma solubilidade na fase líquida. A absorção (transferência de massa) de um gás por um líquido (ou vice-versa) é dependente das propriedades físicas da matriz gás-líquido (difusividade, viscosidade, densidade) assim como das condições do sistema de lavagem (temperatura, pressão, vazão de gás e líquido). Dentre os fatores que aumentam a absorção e a eficiência dos lavadores de gases pode-se citar: baixas temperaturas, grandes áreas de contato entre gás-líquido, grandes vazões de líquido em relação ao gás e grandes concentrações do poluente na fase gasosa. Lavadores de gases são muitas vezes as tecnologias escolhidas, se for necessário alta eficiência na remoção de gases ácidos (WANG *et al.*, 2004).

Dentre os sistemas de lavagem de gases, as Torres de Enchimento são comumente usadas para absorver poluentes presentes em fluxos gasosos.

3.5.2 Torres de Enchimento

A Torre de Enchimento (ou Torre Recheada) é um tipo de lavador de gases onde a fase líquida é dispersa no topo da coluna através de um distribuidor de líquido, escoando na superfície dos elementos de recheio. A seção transversal da torre é completamente ocupada por esses elementos, formando um leito poroso através do qual o líquido e o gás escoam em contracorrente. O contato gás-líquido é feito de maneira contínua. O recheio cumpre a função de sustentar o filme da fase líquida da mesma maneira que permite um adequado contato entre as fases (CALDAS *et al.*, 2003).

Segundo WANG et al. (2004), as Torres de Enchimento levam vantagens comparando-as a outros lavadores de gases, devido ao fluxo contracorrente: o gás passa de maneira ascendente pela torre enquanto o líquido passa de maneira descendente. A transferência de massa do gás para o líquido ocorre na parte recheada da torre.

Os recheios de torres são divididos em dois grupos: os recheios randômicos e os recheios estruturados. Os recheios estruturados são todos aqueles que podem ser colocados na torre de forma ordenada ou arrumada. Já os recheios randômicos são feitos de formas não-uniformes e foram desenvolvidos visando redução de custos. (CALDAS *et al.*, 2003)

A Figura 4 demonstra um esquema de torres com recheios randômico e estruturado.

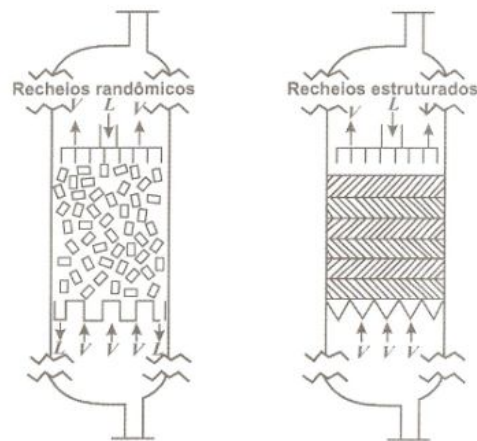


Figura 4: Torres de recheios randômico e estruturado.
Fonte: CALDAS et al. (2003)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Identificação da situação real

Para o dimensionamento de um lavador de biogás do tipo Torre de Enchimento em escala real, foi necessário que se adotasse uma situação real em que ocorresse a utilização de biogás por um grupo gerador de energia elétrica. Foi assumido como principal critério para escolha da situação real um caso em que se fizesse uso de um grupo gerador de energia elétrica da empresa RTP Indústria de Equipamentos Ltda, por ser esta uma empresa parceira na realização deste trabalho, e por facilitar assim o acesso às informações necessárias e ao local de pesquisa. Optou-se também por buscar um caso de emprego de grupo gerador de energia elétrica na suinocultura, devido à grande representatividade desta atividade no Estado de Santa Catarina. Para isto, adotou-se como modelo a propriedade rural Agropecuária Carboni, localizada em Videira - SC, onde existe instalado um grupo gerador movido a biogás (Figura 5) para geração de energia elétrica, em funcionamento desde março de 2009.



Figura 5: Grupo gerador de energia elétrica a biogás instalado na Agropecuária Carboni, no município de Videira – SC.

4.1.1 Caracterização da área

A Agropecuária Carboni LTDA está situada na Rodovia SC 453, Km 53, na região de Vinha Imbuial, pertencente ao município de Videira – SC. O município está situado no Vale do Rio do Peixe, com área de 378,4 km², na latitude 27°00'28" Sul e longitude 51°09'08" a Oeste do meridiano de Greenwich. Possui clima úmido do tipo temperado, com as estações bem definidas e temperaturas médias que variam de 35 °C no verão a 0 °C no inverno. A população atual é de aproximadamente 50.000 mil habitantes e tem nas atividades industriais, comerciais e agrícolas a base de sua economia. No setor primário, o destaque é a fruticultura de pêssego, ameixa e uvas; na pecuária, destaca-se na criação de suínos, aves e bovinos de leite; e no comércio e indústria, o forte são as cantinas de vinho, indústrias de sucos e a empresa Perdigão S A, um dos maiores frigoríficos da América Latina, possuindo a maior da produção de aves e suínos do município e da região, gerando milhares de empregos (VIDEIRA, 2009).

A propriedade é caracterizada como de atividade suinocultora, sendo produtora de leitões. Portanto, consiste em um sistema de criação de suínos que compreende as matrizes, o nascimento dos leitões e o crescimento inicial. Possui um plantel de aproximadamente 960 matrizes e 4.000 leitões, que geram uma média de 29,5 m³ de dejetos por dia. Estes dejetos são encaminhados a dois biodigestores que, juntos, possuem volume de armazenamento de efluentes de 3.790 m³ (Figura 6).



Figura 6: Biodigestores da Agropecuária Carboni.

4.1.2 Caracterização do grupo gerador

O grupo gerador de energia elétrica à biogás, denominado Grupo-gerador RTP modelo 8100B, instalado na Agropecuária Carboni foi desenvolvido pela empresa RTP Indústria de Equipamentos LTDA, e é composto pelos seguintes itens: Motor a combustão interna tipo industrial, estacionário, modelo 8.1L V8 (Figura 7 (a)), Gerador elétrico WEG (Figura 7 (b)) e Paineis de controle e proteção do grupo gerador - marca Woodward (Figura 7 (c)).

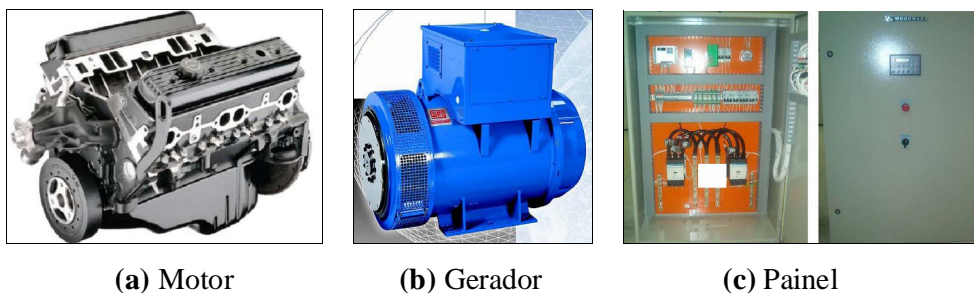


Figura 7: Componentes do grupo gerador RTP modelo 8100B.
Fonte: RTP Indústria de Equipamentos LTDA.

O motor acima possui peças internas protegidas contra efeitos corrosivos de uma concentração de até 200 ppm de H_2S presente no biogás. Foi desenvolvido para operar com um percentual mínimo de 60% de metano no gás e com desempenho previsto de acordo com a Tabela 6, abaixo.

Tabela 6: Desempenho previsto do grupo gerador RTP modelo 8100B

Regime de Operação Contínuo	
Potência	90 kW / 110 kVA
Consumo de biogás*	47 m ³ /h
Fator de Potência	0,8
Percentual de metano	65%

*Poder calorífico inferior considerado PCI = 5.958 kcal/Nm³

Fonte: RTP Indústria de Equipamentos LTDA.

O conjunto possui ainda um sistema de cogeração de água quente, em que um trocador de calor (Figura 8 (a)) transfere calor do sistema para um tanque de água quente, com capacidade de 1.000 litros (Figura 8 (b)). Desta forma, além de produzir energia elétrica, o grupo gerador mantém um reservatório com 1 m³ de água quente para usos diversos na propriedade suinocultora.



(a) Trocador de calor



(b) Reservatório de água quente

Figura 8: Componentes do sistema de cogeração de água quente

4.2 Análises do Biogás

4.2.1 Considerações iniciais

Os biodigestores da Agropecuária Carboni produzem mais biogás do que o necessário para o funcionamento do grupo gerador lá existente. O excesso de biogás produzido é liberado na atmosfera, o que se constitui em um grave problema ambiental que deve ser resolvido com, por exemplo, a instalação de um flare para queima deste gás. Desta forma, este trabalho dedica-se somente à purificação do biogás a ser utilizado na geração de energia elétrica, sendo as análises do biogás bruto focadas para a caracterização qualitativa, para desta forma detectar as concentrações de impurezas a serem retiradas do biogás.

As análises foram realizadas nos meses de março, abril e maio de 2009. Para o tratamento dos dados das análises de biogás foi utilizado o programa Microsoft Excel, através do qual foram elaborados tabela e gráfico que expressem os resultados em relação à área de estudo.

4.2.2 Medição e avaliação da composição do biogás

Para a caracterização qualitativa de biogás no presente trabalho, os dados coletados e analisados foram:

- Concentração de CH_4 (%)
- Concentração de CO_2 (%)
- Concentração de O_2 (%)
- Concentração de H_2S (ppm)

A medição da composição do biogás pelos parâmetros acima descritos realizou-se através de um medidor portátil Dräger X-am 7000, apresentado na Figura 9. Este medidor faz a detecção simultânea e contínua dos gases através de sensores infravermelhos e eletroquímicos, independentes. O aparelho possui uma bomba interna que é acionada para retirar amostras de gases com uma vazão máxima de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, através de uma mangueira de 50 cm, e proporcionar a leitura da composição através dos sensores. Os dados são armazenados em um datalogger (coletor de dados) embutido no aparelho e transferidos para um computador.



Figura 9: Dräger X-am 7000
Fonte: www.draeger.com.br

Os tipos de sensores utilizados para cada gás e as diferentes faixas de concentração dos gases são apresentados na seguinte Tabela 7:

Tabela 7: Faixas de concentração dos gases medidos pelo Dräger X-am 7000.

Gás	Tipo de Sensor	Faixa de concentração	Erro
CH₄	Infravermelho	0 - 100 %	$\leq \pm 5 \%$
CO₂	Infravermelho	0 - 100 %	$\leq \pm 5 \%$
H₂S	Eletroquímico	0 - 1000 ppm	$\leq \pm 5$ ppm
O₂	Eletroquímico	0 - 25 %	$\leq \pm 0,3\%$

Fonte: Manual do aparelho Dräger X-am 7000.

A calibração do aparelho foi realizada quinzenalmente com diferentes gases padrões, com composição de 50% de CH₄ e com 50% de CO₂, e de 500 ppm de H₂S com 500 ppm de N₂.

4.2.3 Medições em campo

Através de uma mangueira própria do aparelho, o Dräger X-am 7000 foi conectado a uma saída de biogás da tubulação que traz o gás do biodigestor até o conjunto moto gerador. Em todas as medições, o aparelho permaneceu ligado até que as concentrações estabilizassem, o que durava aproximadamente cinco minutos. Posteriormente o Dräger X-am 7000 registrou em seu datalogger as concentrações dos gases por uma hora, com intervalo de 30 segundos entre cada registro. O resultado final da análise foi expresso através de uma média diária das concentrações.

4.3 Dimensionamento de lavador de biogás tipo Torre de Enchimento

4.3.1 Considerações iniciais

Na literatura encontram-se diversas metodologias para dimensionamento de Torres de Enchimento muito similares entre si, porém nenhuma envolvendo purificação de biogás.

FOUST e colaboradores (1980) propuseram um dimensionamento de Torres de Enchimento que envolve o cálculo do número de unidades de transferência (de massa), realizando uma estimativa da altura da unidade de transferência de massa da Torre de Enchimento, avaliando também a queda de pressão nestas torres. Isto gera um dimensionamento de área e altura da região de transferência de massa da torre.

Robert Jennings Heinsohn apud DAVIS (2000) havia proposto um dimensionamento muito similar baseado em transferência de massa, envolvendo coeficientes de transferência de massa, coeficientes de difusão gás-líquido e líquido-gás, viscosidade e densidade de gás e líquido, e Lei de Henry.

CALDAS e colaboradores (2003) organizaram um livro sobre componentes internos de Torres de Enchimento (Torres de Recheio) e Torres de Pratos, que também possui uma parte voltada ao dimensionamento de torres utilizando equações fundamentais ligadas à transferência de massa em recheios.

Os métodos práticos utilizados para os cálculos de dimensionamento de Torres de Enchimento foram desenvolvidos, em sua grande maioria, empiricamente, para remoção de CO₂ em plataformas de petróleo e em indústrias petroquímicas. Isso faz com que estas metodologias de dimensionamento das torres tenham sido desenvolvidas para altas vazões de gás, proporcionando lavadores de grande magnitude.

Ao se aplicar estas metodologias para o presente trabalho, chegou-se a resultados não esperados, de dimensões muito pequenas, que fogem do bom senso. Optou-se por adotar um dimensionamento prático embasado nos exemplos especificados pelos autores acima citados, entre outros, visando resultados mais próximos dos exemplos comerciais encontrados no mercado atualmente.

Com relação à escolha do líquido de absorção a ser utilizado, diversos autores apontam na literatura diferentes líquidos para absorção química simultânea de CO_2 e H_2S . O principal problema quanto ao uso de solventes químicos na purificação do biogás se dá na destinação final adequada ao resíduo líquido. Desta forma, optou-se pelo uso de água como líquido de absorção, a fim de se realizar uma absorção física das impurezas do biogás.

O dimensionamento da Torre de Enchimento para purificação do biogás aqui estudado, para uso no grupo gerador de energia elétrica à biogás, denominado Grupo-gerador RTP modelo 8100B, instalado na Agropecuária Carboni, em Videira, SC, se iniciou com a adoção da vazão de biogás de $50 \text{ m}^3/\text{h}$. A adoção deste valor se deu por motivos comerciais, mesmo sendo o grupo gerador desenvolvido para operar com $47 \text{ m}^3/\text{h}$ de biogás.

O critério principal nas tomadas de decisões referentes ao dimensionamento da torre foi o de priorizar a remoção de H_2S , visto que esta impureza é a que mais prejudica o funcionamento do sistema como um todo.

A torre foi dimensionada para uma área de seção circular, o que facilita a construção, operação e dimensionamento da mesma. A construção da torre pode ser feita tanto em material plástico (PE, PVC, PP) como em aço inoxidável, sendo que a escolha do material depende exclusivamente do custo de cada um deles.

Os cálculos foram realizados através do programa Microsoft Excel 2007, e os desenhos da Torre de enchimento foram desenvolvidos no programa AutoCad 2008.

4.3.2 Cálculo do diâmetro da torre

É importante destacar que o diâmetro da Torre de Enchimento é calculado em função do dimensionamento da área recheada da torre, ou seja, o diâmetro da torre é o mesmo de sua área recheada.

O cálculo do diâmetro da Torre de Enchimento foi realizado fixando-se a velocidade do biogás na torre em $0,3 \text{ m/s}$, para garantir um maior tempo de contato entre gás e líquido, e também levando em consideração que os exemplos estudados para remoção de CO_2 e H_2S utilizam este valor. A partir da velocidade e da vazão do gás, encontra-se a área da seção, de onde se calcula o diâmetro da seção da torre.

Jorge Navaes Caldas (CALDAS *et al.*, 2003) propõe o dimensionamento de duas Torres de Enchimento: uma para remoção de CO₂ e outra para remoção de H₂S de uma planta de craqueamento catalítico. Para os dois exemplos citados foram utilizados diferentes métodos para o cálculo do diâmetro da torre, porém os resultados tinham em comum proporcionar ao gás uma velocidade dentro da torre de 0,3m/s.

Tom Card (2001; apud STUETZ *et al.*, 2001) relata que a velocidade máxima do gás em Torres de Enchimento para controle de odores deve ser por volta de 3m/s, sendo que muitos destes sistemas de controle de odor que operam bem são dimensionados para velocidades entre 1 e 2m/s. Shigeru Yamagata (1990; apud SUHARA, 1990) propõe para uma Torre de Enchimento removendo amônia uma velocidade de 0,96m/s.

4.3.3 Cálculo do volume de recheio

Nas Torres de Enchimento, a transferência de massa entre as fases gasosa e líquida ocorre na parte recheada da torre. Segundo Tom Card (2001; apud STUETZ *et al.*, 2001), 1 m³ de recheio para cada 0,5 m³/s de fluxo de gás irá promover 99% de remoção de sulfeto de hidrogênio. Este valor foi fixado para tratamento de odores em sistemas de tratamento de efluentes urbanos, o que condiz com seu uso em biogás, portanto, adotado no presente trabalho.

4.3.4 Taxa de circulação de líquido

A taxa de circulação ótima de líquido é normalmente 170 l/min para cada 1 m³/s de fluxo de gás. Esta taxa nunca deverá ser inferior a 85 l/min (STUETZ *et al.*, 2001). Shigeru Yamagata (1990; apud SUHARA, 1990) propõe duas vazões de líquido para um mesmo estudo: 52,15 l/min para cada 1 m³/s de gás e 85,7 l/min para cada 1 m³/s de gás. A diferença do uso destas duas vazões se dá na otimização da torre, reduzindo o volume de recheio da mesma em 53,33% no segundo caso.

Como uma maior relação líquido/gás oferece uma otimização da torre e, por conseqüência, uma melhor eficiência de remoção de impurezas, optou-se pela adoção

da taxa de circulação ótima proposta por Tom Card (2001; apud STUETZ *et al.*, 2001) de 170 l/min para cada 1 m³/s de fluxo de gás.

Após o uso no lavador, é necessária uma correta destinação do líquido de absorção. Como neste caso utilizar-se-á água, não é necessário a implementação de um sistema de tratamento do efluente gerado na torre, devido às características do mesmo. É indicado que este líquido seja encaminhado ao sistema de cogeração de água quente, sendo então reutilizado para a higienização dos chiqueiros dos suínos.

4.3.5 Internos da torre

Os internos de torres são todos os dispositivos colocados no interior das torres de Enchimento e que são responsáveis pelo adequado funcionamento das mesmas. O recheio a ser escolhido deve apresentar algumas qualidades, tais como: alta porosidade e alta área específica, baixa perda de carga, resistência química e mecânica, formato irregular de modo a evitar escoamento preferencial, baixo custo e baixo peso específico (CALDAS *et al.*, 2003).

Após o recheio, os internos mais importantes são o distribuidor de líquido e o suporte de recheio. As torres que tiverem altas taxas de circulação de líquido e baixas vazões de gás não necessitam que estes internos sejam sofisticados (STUETZ *et al.*, 2001).

Um parâmetro utilizado no projeto dos distribuidores de líquido em Torres de Enchimento é o número de pontos de distribuição requerido por área de seção transversal de coluna. É comum entre os fabricantes adotar 100 pontos por m² (KOBAYASI, 1998).

A velocidade de entrada do gás na torre também deve ser cuidadosamente projetada. O gás nunca deverá entrar na torre com velocidades acima de 7,6 m/s, sendo que o ideal deverá ser 5 m/s (STUETZ *et al.*, 2001).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Características do biogás a ser tratado

A Tabela 8 demonstra o resultado das análises qualitativas do biogás medido na Granja Carboni. Este mesmo resultado foi ilustrado na Figura 10, para uma melhor percepção visual.

Tabela 8: Análises qualitativas do biogás da Granja Carboni

	10/03/2009	02/04/09	13/05/09
CH₄ (%)	65	70,0	66,0
CO₂ (%)	33,5	29,5	32,0
O₂ (%)	1,5	0,5	2,0
H₂S (ppm)	↑↑ 1.000	↑↑ 1.000	↑↑ 1.000

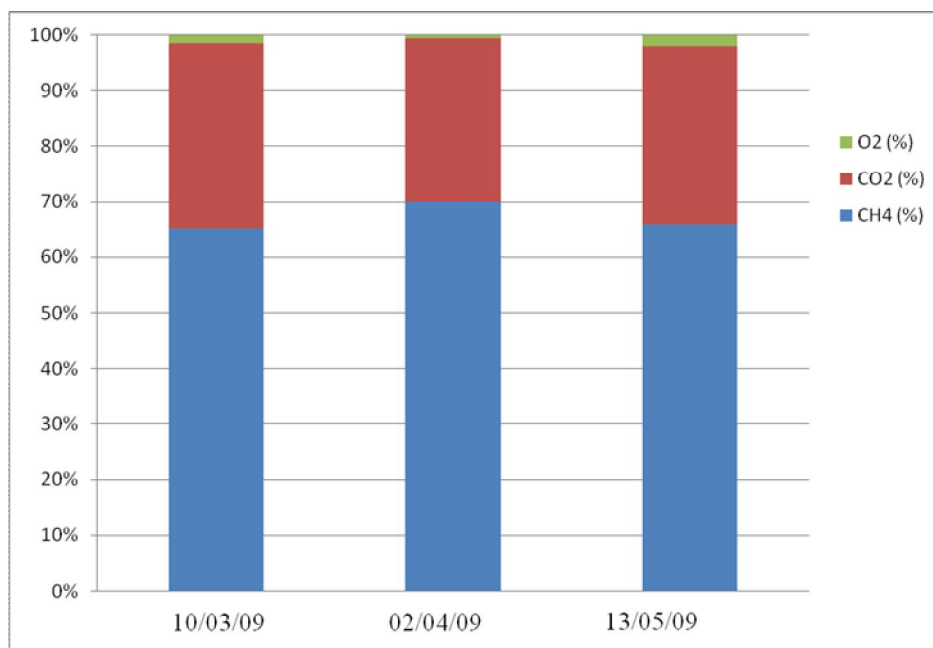


Figura 10: Análises qualitativas do biogás da Granja Carboni

Os resultados acima apontados representam uma média das análises feitas durante o período de uma hora em cada dia identificado, porém, é importante salientar que estes números não variaram durante as medições. O comportamento homogêneo das concentrações dos gases do biogás durante as análises demonstra um bom funcionamento dos biodigestores da Granja Carboni.

O grupo gerador RTP 8100 B foi desenvolvido para operar com concentração mínima de 60% de CH₄ no biogás. As análises realizadas demonstram que as concentrações de metano no biogás da Granja Carboni tiveram pequenas variações ($67,5 \pm 2,5\%$), e se mantiveram sempre acima do mínimo necessário para o bom funcionamento do motor (60%), segundo o fabricante do mesmo. Se incluído o erro de medição do aparelho Drager X-am 7000 ($\leq \pm 5\%$) e supondo a pior condição possível, o percentual mínimo encontrado de metano no biogás é justamente 60%, ou seja, o mínimo exigido pelo fabricante.

Sendo assim, a remoção de CO₂ do biogás passa a ser importante como uma forma de aumentar o poder calorífico inferior do biocombustível, aumentando assim o potencial energético do mesmo, mas deixa de ter papel fundamental para o funcionamento do grupo gerador. Isto se deve ao fato de que a concentração mínima de CH₄ encontrada no biogás da Granja Carboni é suficiente e aceitável para o funcionamento do sistema.

Os resultados obtidos para as concentrações de H₂S sempre foram superiores ao máximo detectável pelo aparelho Drager X-am 7000, 1000 ppm. Segundo Pires (2000; apud PINTO, 2006), as concentrações de H₂S no biogás podem chegar a 5000 ppm. Sabendo-se que o motor do grupo gerador possui proteção para que opere com uma concentração de até 200 ppm de H₂S no biogás, a remoção de sulfeto de hidrogênio passa a ser fundamental para o bom funcionamento do sistema, de forma a assegurar uma longa vida útil ao motor e gerar condições para que a tecnologia de geração de energia elétrica através do biogás possa ser amplamente difundida.

5.2 Torre de Enchimento

5.2.1 Dimensionamento da Torre de Enchimento

A Tabela 9 indica um resumo dos parâmetros adotados, através dos quais se realizou o dimensionamento da Torre de Enchimento, que se encontra na Tabela 10.

Tabela 9: Parâmetros adotados para o dimensionamento da Torre de Enchimento

Parâmetro	
Vazão de biogás	50 (m ³ /h)
Velocidade do gás na torre	0,3 (m/s)
Volume de recheio	1 m ³ para cada 0,5m ³ /s de gás
Taxa de circulação de líquido	170 l/min para cada 1m ³ /s de gás
Velocidade de entrada do biogás	5 (m/s)

Tabela 10: Dimensionamento da Torre de Enchimento

	Resultado	Valor Adotado
Diâmetro da torre (m)	0,2425	0,25
Volume de recheio (l)	27,76	28
Altura do recheio (m)	0,57	0,6
Taxa de circulação de líquido (l/min)	2,36	2,36
Diâmetro da entrada do biogás (mm)	59,45	60

Devido ao não conhecimento exato da concentração de H₂S no biogás, e sabendo-se que as concentrações deste gás no biogás proveniente da suinocultura são altas, adotou-se um fator de segurança de 50% para a altura do recheio e, conseqüentemente, para o volume de recheio, e para a taxa de circulação de líquido. Sendo assim, a tabela anterior se modifica, gerando novos valores encontrados na Tabela 11.

Tabela 11: Dimensões adotadas da Torre de Enchimento

	Valor Adotado
Diâmetro da torre (m)	0,25
Volume de recheio (l)	44,2
Altura do recheio (m)	0,9
Taxa de circulação de líquido (l/min)	3,54
Diâmetro da entrada do biogás (mm)	60

Fixando a velocidade de entrada do biogás na Torre de Enchimento em 5 m/s, encontra-se um diâmetro de 59,45 mm para a tubulação de entrada do biogás na torre. Adotou-se uma tubulação de PVC, devido a toda tubulação de biogás na propriedade Carboni ser deste material, com diâmetro de 60 mm, pois é o diâmetro comercial mais próximo do valor encontrado.

5.2.2 Internos da torre

5.2.2.1 Escolha do recheio

Para esta torre foi adotado a utilização de recheios randômicos, pois são os que apresentam maior vantagem econômica, além de serem indicados para projetos de pequenas vazões de gás (CALDAS *et al.*, 2003).

Dentre os diversos tipos de recheios randômicos, optou-se pela escolha do Anel Pall, mais conhecido por Pall Ring (Figura 11). É um recheio de alta eficiência, com grande flexibilidade. Possui não somente propriedades operacionais superiores, quando comparado a outros recheios randômicos clássicos, mas apresenta também vantagens econômicas de fabricação, pois pode ser produzido com uma espessura de parede bem fina.



Figura 11: Anéis Pall
Fonte: www.mtl-us.com

Os anéis Pall são disponíveis em metal e plástico de diversos tamanhos. Para o uso em purificação de biogás, é indiferente o uso destes anéis de plástico ou de aço inoxidável, prevalecendo a preferência pelo de menor custo. Segundo a Sermat Calderaria e Montagens (www.sermatmon.com.br), os preços do anel Pall em aço inoxidável e em plástico são muito similares, podendo variar se comprado em maiores quantidades. Sendo assim, optou-se pelo de aço inoxidável.

Quanto ao tamanho, optou-se pelo de 16 mm, ou 5/8 pol., pois o diâmetro do recheio deverá ser menor que 1/8 do diâmetro da torre, preferencialmente metade deste valor, ou seja, 1/16 do diâmetro da torre (CALDAS *et al.*, 2003).

5.2.2.2 Distribuidor de líquido

A adoção de 100 pontos de distribuição de líquido por m² de seção de torre, muito usual em aplicações industriais, não satisfaz a necessidade do presente trabalho. Se este parâmetro fosse adotado, o distribuidor de líquido teria 5 pontos de distribuição, ou seja, 5 orifícios, o que facilitaria o surgimento de caminhos preferenciais de escoamento. KOBAYASI, 1998, realizou um estudo comparativo de dois diferentes distribuidores de líquido (Figura 12) em uma Torre de Enchimento de pequena escala (diâmetro de 0,4 m) com diferentes vazões de líquidos.

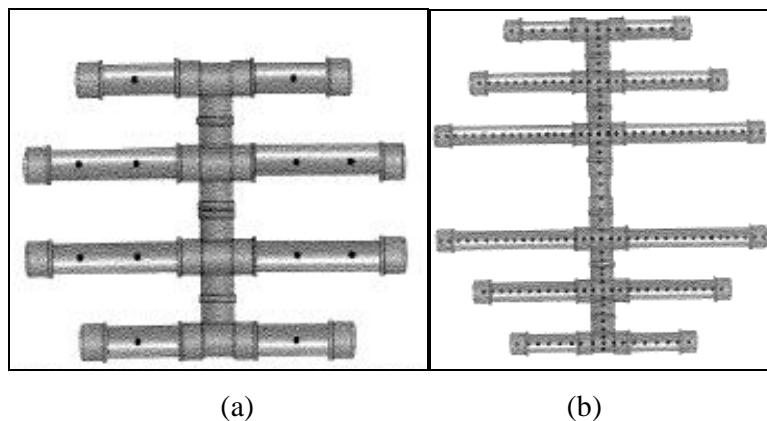


Figura 12: Distribuidores de líquido tipo I (a) e tipo II (b).
Fonte: KOBAYASI, 1998

O distribuidor de líquido tipo I (Figura 12 (a)) foi dimensionado pelo parâmetro usual de aplicações industriais (100 pontos de distribuição/m²), em tubo de PVC de 1 pol. enquanto o tipo II (Figura 12 (b)) foi feito em tubo de PVC de 1/2 pol., com orifícios distantes de 10 mm. Ambos os distribuidores se demonstraram eficientes, porém para vazões menores, semelhantes às do presente trabalho, o distribuidor de líquido tipo II se demonstrou melhor.

Adotou-se um distribuidor de líquido semelhante ao tipo II, apresentado por KOBAYASI, 1998. As características do distribuidor se encontram na Tabela 12:

Tabela 12: Características do distribuidor de líquido

Material	PVC
Diâmetro da tubulação (pol.)	1/2
Diâmetro do orifício (mm)	3
Distância entre os orifícios (mm)	10

A chegada de líquido no distribuidor será superior e central, através de tubulação de PVC de 1/2 pol.. Para uma melhor homogeneização do distribuidor, a região abaixo da chegada do líquido será desprovida de orifícios.

5.2.2.3 Suporte de recheio

Adotou-se a grade-suporte simples (Figura 13), também conhecida como grade-suporte ondulada. Esta escolha foi feita por ser a opção mais barata e a mais utilizada em Torres de Enchimento com diâmetro de até 0,6 m (CALDAS *et al.*, 2003, e www.sermatmon.com.br).

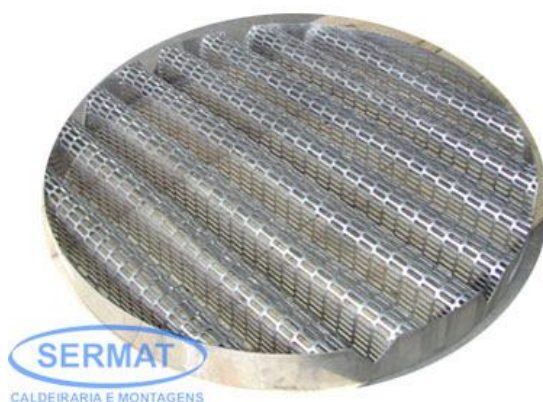


Figura 13: Grade-suporte simples
Fonte: www.sermatmon.com.br

5.2.3 Aspectos Gerais da torre de Enchimento

No desenvolvimento da Torre de Enchimento, optou-se por projetar um reservatório de líquido na base da mesma. Esta medida foi adotada no caso de se optar pelo funcionamento da torre com recirculação de líquido.

Os eliminadores de gotas são componentes colocados no topo da Torre de Enchimento com o objetivo de retirar as gotas que não precipitaram no processo de lavagem, ou foram carreadas pelo gás. O dimensionamento deste componente é realizado pelos próprios fabricantes e seus cálculos não são disponibilizados. Para este caso, foi requisitado pela Sermat Calderaria e Montagens, um espaço de 20 cm de altura no topo da torre para a implementação deste componente.

A Tabela 13 especifica os aspectos gerais da Torre de Enchimento.

Tabela 13: Aspectos Gerais da Torre de Enchimento.

Vazão de Biogás (Nm ³ /h)	50
Líquido de Absorção	Água
Taxa de Circulação de Líquido (l/min)	3,54
Altura da Torre (m)	1,93
Diâmetro da Torre (m)	0,25
Altura do Recheio (m)	0,9
Tipo de Recheio	Anéis Pall
Tamanho do Recheio (pol.)	5/8
Volume de Recheio (l)	44,2
Material de Fabricação do Recheio	Aço Inoxidável
Tipo de Suporte de Recheio	Grade-Suporte Simples
Material do Suporte de Recheio	Aço Inoxidável
Material de Construção da Torre	Polipropileno
Tubulação de Entrada do Biogás (mm)	60
Tubulação de Saída do Biogás (mm)	60
Tubulação de Entrada do Líquido (pol.)	1/2 (PVC)
Tubulação de Saída do Líquido (pol.)	1/2 (PVC)
Tubulação do Distribuidor de líquido (pol.)	1/2 (PVC)
Altura Disponível para Eliminador de Gotas (cm)	20
Volume do Reservatório de Líquido (l)	42,4

5.2.4 Desenho da Torre de Enchimento

Na Figura 14 encontra-se o desenho detalhado da Torre de Enchimento, dimensionada para a remoção de CO₂ e H₂S de um fluxo de 50 Nm³/h de biogás proveniente do tratamento de dejetos suínos da Granja Carboni, em Videira – SC. Em destaque no lado direito, encontra-se o esquema do distribuidor de líquido e a disposição de seus orifícios.

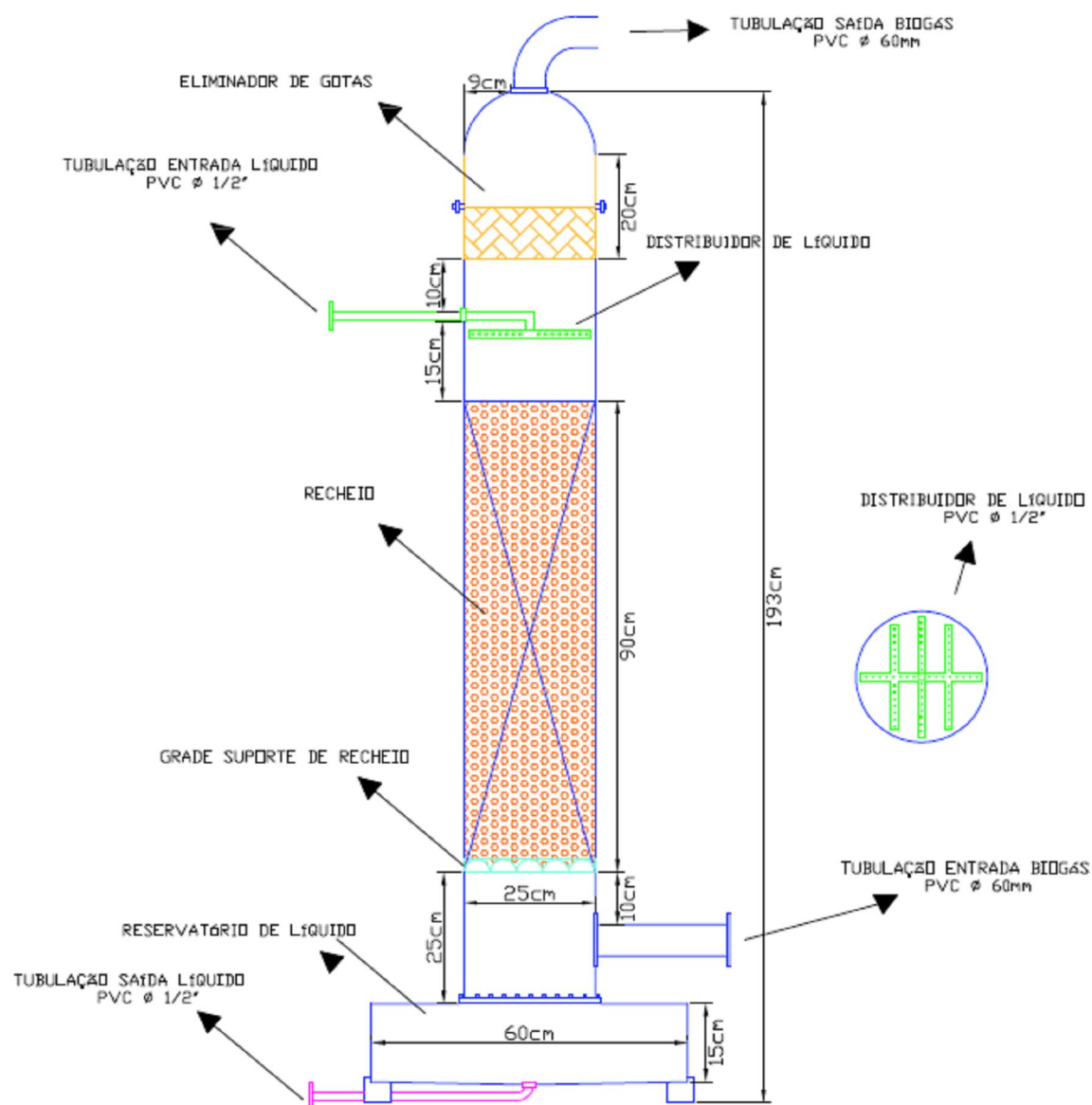


Figura 14: Torre de Enchimento

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para a realização deste trabalho, não foi possível a aplicação de metodologias usuais de dimensionamento de Torres de Enchimento. Pode-se concluir que tais metodologias não se aplicam a ocasiões em que se deseja purificar baixas vazões de gases, visto que as mesmas foram desenvolvidas para projetos em grande escala. Isto aponta para a necessidade de se investir em pesquisas relacionadas à purificação de biogás para a geração distribuída de energia elétrica, almejando suprir a falta de metodologias no dimensionamento de equipamentos com esta finalidade.

Tendo em vista a necessidade de dimensionar uma Torre de Enchimento, para purificar o biogás produzido por biodigestores na Granja Carboni, em Videira – SC, operar em conjunto com o grupo gerador RTP modelo 8100B, e suprir a vazão de 50m³/h de biogás requerida pelo sistema, conclui-se que, para estas condições, as dimensões da torre são 0,25 m de diâmetro e 1,93 m de altura, e o volume de recheio é de 44,2 l, ocupando 0,9 m de altura da torre.

A Torre de Enchimento se demonstra um equipamento de aplicação viável, visto que suas dimensões são compatíveis com o sistema implementado de geração de energia elétrica. Por não ser constituída, em grande parte, de materiais onerosos, torna-se também um equipamento economicamente viável, podendo ser amplamente difundido e comercializado.

A partir das pesquisas realizadas, podem-se fazer as seguintes recomendações:

- Deve-se realizar a remoção da umidade após a Torre de Enchimento, visto que o uso do eliminador de gotas retira somente as gotas que não precipitaram no processo e o biogás sai do processo saturado de água, o que pode prejudicar o bom funcionamento do motor do grupo gerador;

- Propõe-se que seja medida a perda de carga para o sistema apresentado após sua construção. É provável que seja necessário uma readequação da potência do ventilador utilizada no sistema para suprir a perda de carga da torre;

– Outros líquidos de absorção podem ser utilizados para a remoção conjunta de CO₂ e H₂S, como soluções aquosas de: EDTA, Fe/EDTA, MEA, MDEA, TBEE, DEA, AMP, CuSO₄^{*}, e suas combinações. Estas soluções fazem com que a absorção passe a ser física e química, potencializando a remoção das impurezas e permitindo sua recirculação. A principal desvantagem do uso destes líquidos ao invés de água é que não é possível a reutilização dos mesmos, devido à suas características químicas. Nestes casos, é necessária a instalação de um processo para tratamento do efluente gerado na lavagem do biogás. Este empecilho pode inviabilizar a implementação deste sistema principalmente no meio rural, por ser carente de sistemas de tratamento deste tipo de efluentes e pelo aumento do custo operacional do sistema de purificação de biogás;

* Os significados das siglas correspondentes se encontram na Lista de Abreviaturas e Siglas.

– Para o caso de se operar a Torre de Enchimento com recirculação do líquido de absorção química, ou seja, outros líquidos que não seja a água, se deve instalar um filtro para remoção de material particulado gerado no líquido, evitando assim a colmatção do distribuidor de líquido da torre;

– O uso de pressões elevadas na operação da torre aumenta consideravelmente a eficiência do processo de remoção de CO₂. Porém, quando são utilizadas pressões elevadas, obrigatoriamente utilizam-se equipamentos e peças de maior porte, sendo normalmente mais onerosas. Pode-se trabalhar com pressões levemente elevadas, através de válvulas reguladoras de pressão, quando houver necessidade de maior remoção de CO₂, sem elevar demasiadamente os custos;

– Recomenda-se a realização de trabalhos futuros envolvendo estudos com o uso do efluente da suinocultura tratado como líquido de absorção na Torre de Enchimento. Para este caso, deve-se instalar um filtro de material particulado antes da entrada do líquido na torre. Recomenda-se também um estudo comparativo do sistema apresentado neste trabalho com a purificação de biogás por adsorção através de Óxido de Ferro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J.W.S. **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos**. Dissertação de Mestrado, PIPGE/USP, São Paulo, 2000.

AVELLAR, L.H.N. **A Valorização dos Subprodutos Agroindustriais Visando a Co-geração e a Redução da Poluição Ambiental**. Tese de Doutorado, UNESP, Guaratinguetá, 2001.

AVELLAR, L.H.N.; COELHO, S.T. e ALVES, J.W. **Geração de Eletricidade com Biogás de Esgoto: Uma Realidade. Geração de eletricidade a partir do biogás produzido no tratamento de esgotos**. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento - nº 29, 120-122. 2002

BELLI F°, P. **Stockage e odeurs des dejections animales, cas du lisier de porc**. 1995. 250 f. Tese de doutorado. Université de Rennes, France, 1995.

CALDAS, J. N.; LACERDA, A. I. **Internos de Torres: pratos & recheios**, Rio de Janeiro: EdUERJ, 2003. 484p.

CCE – Centro para a Conservação da Energia. **Guia Técnico de Biogás**. Portugal, 2000, 106p.

CHERNICHARO, C.A.L. (1997). **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 1997. v. 5, 246p.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. Dissertação de Mestrado, PIPGE/USP, São Paulo, 2006.

DAVIS, W. T. (org.), **Air pollution engineering manual**. 2º edição, 2000, 886p.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. C.; MAUS, L. e ANDERSEN, L. B., **Princípios das Operações Unitárias**. 1980. 670p.

KOBAYASI, M. S., **Caracterização e quantificação da distribuição do líquido descendente de uma coluna de recheio em escala piloto**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 1998.

LA FARGE, B., **Le Biogaz – Procédéz de fermentation méthanique**. Paris, 1995.

MAZUNDAR, A. **Biogas handbook. Bombay: Pilot Edition**. TATA Energy Institute, 1982, 247p.

METCALF e EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 2nd. ed. New York: McGraw, 1979. 920p.

PINTO, R. O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. 2006. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

ROSS, C.C.; DRAKE, T.J. e WALSH, J.L. **Handbook of biogas utilization**. 2nd. ed. Atlanta: U.S. Department of Energy, 1996, pag. irreg.

SCHIFFTNER, K. C.; HESKETH, H. E., **Wer Scrubbers Second Edition**. 1996, 206 p.

SCHNELLE, K. B.; BROWN, C. A., **Air Pollution Control Technology Handbook**. CRC Press, 2001.

STUETZ, R.; FRECHEN, F., **Odours in Wastewater Treatment**. Londres. IWA Publishing, 2001. 437p.

SUHARA, R. K., **Tecnologia de Controle de Emissão de Vapores Inorgânicos e Orgânicos**. CETESB, São Paulo, 1990.

TREYBAL, R.E., **Mass-transfer operations**. 3^o edição, 1980, 784 p.

VIDEIRA. **Aspectos Geográficos e Localização**. Disponível em:
www.videira.sc.gov.br. Acessado em 16/06/2009.

WANG, L.K.; PEREIRA, N.C.; HUNG, Y., **Handbook of Environmental Engineering, Air Pollution Control Engineering**. vol 1, Humana Press, 2004.